



وارون سازی منحنی پاشش امواج ریلی با استفاده از الگوریتم گرده افشانی گل بهینه جهت تعیین ساختار سرعت موج برشی

نسا عیسی زاده^۱، راشد پورمیرزائی^{۲*}، رامین نیکروز^۳ و محمد نورمحمدی برندق^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد زلزله شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه

۲- استادیار، گروه مهندسی معدن و مواد، دانشگاه صنعتی ارومیه

۳- دانشیار، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد زلزله شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه

دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۱۲/۲۹؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۵/۱۴

*نویسنده مسئول مکاتبات: rashed.poormirzaee@gmail.com

چکیده

وارون سازی منحنی پاشش امواج سطحی یکی از مسائل کاربردی در شناسایی لایه های زمین و فرآیند تعیین سرعت انتشار امواج برشی است. روش های خطی وارون سازی، به علت طبیعت غیرخطی مساله و امکان درگیر شدن عملیات بهینه یابی تابع هدف با جواب های بهینه محلی، چندان قابل اعتماد نمی باشند. با پیشرفت علوم کامپیوتر و ارائه شدن الگوریتم های بهینه سازی هوشمند، می توان تکنیک های سریع و آسانی را برای وارون سازی امواج سطحی استفاده نمود. به همین منظور برای افزایش اطمینان از عملیات وارون سازی و دستیابی به جواب های بهینه کلی مساله، در این مطالعه الگوریتم گرده افشانی گل بهینه برای وارون سازی امواج سطحی معرفی شده است. هدف نهایی این الگوریتم در وارون سازی امواج سطحی یافتن پارامترهای مدل، یعنی ضخامت، سرعت موج برشی و سرعت موج طولی لایه های خاک است. در الگوریتم معرفی شده در مقایسه با الگوریتم گرده افشانی گل استاندارد، سعی شد مکانیسم جستجوی الگوریتم جهت افزایش دقت و همگرایی، بهینه شوند. روش پیشنهادی ابتدا در نرم افزار متلب کد نویسی شد و سپس کارایی الگوریتم به وسیله ی مدل های مصنوعی و مدل مصنوعی نوفه دار مورد ارزیابی قرار گرفت. در ادامه برای ارزیابی بیشتر روش ارائه شده، الگوریتم پیشنهادی روی داده های تجربی اعمال شد. نتایج وارون سازی، در مورد مدل های مصنوعی و نیز داده های تجربی، بیانگر عملکرد قابل قبول الگوریتم گرده افشانی گل بهینه در وارون سازی امواج سطحی است. همچنین عملکرد الگوریتم بهینه شده پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم گرده افشانی گل استاندارد در وارون سازی منحنی پاشش از دقت و سرعت همگرایی بالاتری برخوردار است.

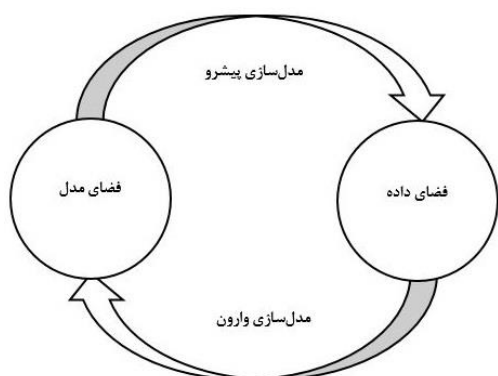
واژگان کلیدی

امواج سطحی
سرعت موج برشی
وارون سازی
الگوریتم گرده افشانی گل بهینه

۱- مقدمه

از جمله مطالعات انجام شده در بکاربری الگوریتم‌های فراابتکاری در زمینه وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای، می‌توان به مطالعات Poormirzaee et al. (2018) و Poormirzaee (2018) اشاره نمود که از الگوریتم‌های ژنتیک چند هدفه و بهینه‌سازی گروه ذرات برای وارون‌سازی امواج سطحی و همچنین وارون‌سازی همزمان منحنی پاشش موج ری‌لی و زمان رسیدهای انکساری استفاده کرده‌اند.

روش تولید مصنوعی داده‌های مشاهده‌ای، متأثر از یک چشمه مشخص و در یک محیط مشخص، حل مساله پیشرو نامیده می‌شود. روش بازسازی چشمه فیزیکی، ژئوفیزیکی و یا هر چشمه مربوط به هر پدیده دیگری و بازسازی پارامترهای ساختاری موردنظر، از روی داده‌ای مشاهده شده، حل مساله وارون نامیده می‌شود (Roy, 2007) (شکل ۱).



شکل ۱: ارتباط بین فضای مدل و داده‌های مرتبط با آنها در یک مساله پیشرو و وارون (Roy, 2007).

در وارون‌سازی، هدف یافتن مدلی از زمین است که توضیح‌دهنده مشاهدات ژئوفیزیکی باشد. در وارون‌سازی بر مبنای مدل با استفاده از مدل‌سازی پیشرو به وسیله تعیین پارامترهای مدل می‌توان داده مصنوعی ایجاد کرد و در قالب یک تابع هدف، این داده مصنوعی ایجاد شده را با داده ژئوفیزیکی مشاهده‌ای مقایسه کرد؛ که این قیاس از طریق بهینه‌سازی تابع هدف انجام می‌گیرد. این تابع وابسته به پارامترهای مدل است و در مسائل وارون ژئوفیزیکی معمولاً این وابستگی غیرخطی است. در بیشتر روش‌های وارون‌سازی، داده‌های ژئوفیزیکی بر اساس راهکارهای خطی برای تخمین پارامترهای مدل در نظر گرفته می‌شوند. روش کار بدین صورت است که از یک الگوریتم بهینه‌سازی محلی^۴ برای بهبود مدل اولیه که توسط مفسر تعریف می‌گردد، استفاده می‌شود. این تخمین‌ها در تکرارهای معین محاسبه می‌شوند و تخمین با کمترین مقدار هدف (تابع خطا) به عنوان نتیجه نهایی معرفی می‌گردد (Wathelet, 2005). در این روش‌ها جواب‌ها ممکن است در کمینه‌های محلی گیر افتاده و این نقاط به عنوان نتایج نهایی معرفی گردند. در نتیجه موفقیت این روش‌ها به

گام نهایی در روش‌های مبتنی بر اندازه‌گیری امواج سطحی استفاده از منحنی‌های پاشش به‌دست‌آمده، برای تخمین پروفیل سرعت موج برشی لایه‌های زمین است، که در اصطلاح وارون‌سازی نامیده می‌شود. وارون‌سازی منحنی پاشش فرآیند تعیین سرعت انتشار موج واقعی (به‌ویژه سرعت موج برشی) است. ساده‌ترین راه به دست آوردن سرعت موج برشی با استفاده از منحنی پاشش این است که سرعت موج برشی تقریباً ۱۱۰ درصد سرعت موج ری‌لی و عمق نمونه‌برداری ۰/۵ تا ۰/۳۳ طول موج فرض شود (Nazarian, 1984). وجود یک لایه با سرعت‌های نسبتاً زیاد یا کم نزدیک به سطح باعث یک جابجایی کلی سرعت موج ری‌لی در منحنی پاشش به سمت سرعت‌های بالا یا پایین خواهد شد. بنابراین استفاده از این روش ساده وارون‌سازی موجب درجاتی از خطا خواهد شد. هر چند برای بسیاری از خاک‌ها که ویژگی‌های خاک دارای تغییرات زیاد نباشد؛ استفاده از این روش با خطای اندکی همراه است. از این‌رو روش‌های مختلفی برای وارون‌سازی منحنی پاشش توسط محققین مختلف ارائه شده است. Nazarian (1984) وارون‌سازی بر مبنای استفاده از ماتریس هسکل-تامسون با اندکی تغییرات برای یک محیط چند لایه را بکار برد.

Herman (1994) با استفاده از روش حداقل مربعات میرا شده همراه با یک مدل اولیه که معمولاً برای محاسبه مشتقات استفاده می‌شود، پروفیل سرعت موج برشی را بدست آورد.

در دسته جدیدی از روش‌ها مبتنی بر نمونه‌های شبه تصادفی^۱ یکنواخت از فضای پارامترها در ژئوفیزیک رایج شده است؛ از جمله، شبیه‌سازی تبرید^۲ ارائه شده توسط Sen and Stoffa (1991)، الگوریتم ژنتیک توسط Lomax and Snieder (1994) و الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی^۳ که توسط Sambridge (1999) توسعه یافته است، هدف جستجوی تمام فضای پارامتر است؛ تا مجموعه پارامترهای با بهترین انطباق با داده را بیابند. همچنین Wathelet et al. (2005) کد جدیدی را با استفاده از الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی توسعه دادند؛ تا منحنی‌های پاشش را وارون کنند (Wathelet et al., 2005). البته در سال‌های اخیر الگوریتم‌های بهینه‌سازی کاملاً تصادفی و هوشمندی به نام الگوریتم‌های فراابتکاری ارائه شده‌اند. این الگوریتم‌ها سعی می‌کنند با تبعیت از قواعدی کاملاً هوشمند (که اغلب از طبیعت الهام گرفته شده) فضای جستجو را پیمایش کنند و سپس بهینه کلی را معرفی نمایند. از جمله الگوریتم‌های فراابتکاری می‌توان به الگوریتم ازدحام ذرات، الگوریتم خفاش، الگوریتم گرده‌افشانی گل و ... اشاره نمود.

1-pseudo-random

2-Simulated Annealing

3-Neighborhood

4-Local optimization

پیشنهادی در وارون‌سازی امواج ری‌لی نیز مورد بحث قرار گرفته است.

۲- وارون‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی

هدف اصلی در تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی، بدست آوردن اطلاعات زیرسطحی از داده‌های برداشت‌شده در سطح زمین است. به طور کلی فرآیند وارون‌سازی دارای ابهام ذاتی است؛ اما ترکیب دیگر داده‌ها همچون اطلاعات زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی به تجزیه و تحلیل وارون‌سازی، طیف وسیعی از مدل‌های احتمالی را محدود می‌کند و یک مدل مفهومی نهایی ارائه می‌دهد.

در بسیاری از مسائل ژئوفیزیکی مقادیر خطا به شکل تابعی از پارامترهای مدل هستند که عبارتند از اختلاف داده مشاهده شده و داده پیش‌بینی شده، که به شکل زیر نشان داده می‌شود:

$$E_i = d_i^{obs} - d_i^{predicted} \quad (1)$$

این تابع خطا (معادله ۱)، می‌تواند بسیار پیچیده و شامل چندین کمینه و بیشینه باشد. کوچکترین این کمینه‌ها را کمینه کلی و تمامی کمینه‌های دیگر را کمینه محلی می‌نامند. برای بدست آوردن کمینه کلی از روش بهینه‌سازی استفاده می‌شود (Menke, 1989). مهم‌ترین روش‌های حل مسائل بهینه‌سازی را می‌توان در سه دسته طبقه‌بندی کرد: الگوریتم‌های قطعی، الگوریتم‌های ابتکاری و الگوریتم‌های فراابتکاری (Neumüller et al., 2012). بهینه‌سازی محلی و الگوریتم‌های جستجو مانند روش‌های گرادیان نزولی معمولاً یک کمینه محلی در نزدیکی نقطه شروع پیدا می‌کنند. تقریباً تمامی روش‌های جستجوی محلی، الگوریتم‌های قطعی^۱ هستند. این الگوریتم‌ها هنگامی که نقطه شروع نزدیک به یکی از کمینه‌های محلی است، در یافتن کمینه کلی موفق نخواهند بود؛ اما اغلب الگوریتم‌های بهینه‌سازی کلی دارای ماهیت آماری هستند و از اطلاعات عمومی‌تری از سطح خطا برای به‌روز کردن موقعیت خودشان (در فضای خطا) بهره می‌برند. البته لازم به‌ذکر است که در این روش‌ها رسیدن به یک جواب بهینه کلی تضمین نمی‌شود. با این وجود نتایج آزمایش‌های انجام شده این مطلب را تأیید می‌کنند؛ که حتی با مدل‌های اولیه ضعیف نیز، روش‌های کلی می‌توانند جواب‌های مناسبی را تخمین بزنند (Yang, 2010).

در مسائل بهینه‌سازی فضای جستجو به‌عنوان مجموعه‌ای از تمامی جواب‌های ممکن برای مساله مورد بررسی تعریف می‌شود. هر نقطه از فضای جستجو یک جواب ممکن است و هر جواب را می‌توان بر اساس ارزش آن رتبه‌بندی کرد. هدف از پیدا کردن جواب قابل‌قبول، مشخص کردن حدود نهایی تابع هدف (مقدار کمینه یا بیشینه) در فضای جستجو است. در مسائل بهینه‌سازی معمولاً مطلوبیت تعداد نقاط کمی از فضای جستجو مشخص است و سعی می‌شود از طریق ایجاد نقاط جدید به پیدا کردن جواب‌ها ادامه داد؛ تا به جواب بهینه نزدیک شد.

اصول روش‌های فراابتکاری بر مبنای تصمیمات تصادفی است؛ با

مدل اولیه بستگی دارد؛ که چه مقدار به جواب واقعی نزدیک باشد. روش‌های بهینه‌سازی کلی^۱ این قابلیت را دارند که جواب‌هایی مستقل از مدل اولیه تولید نمایند و فضای جستجو را به صورت جامع بررسی و جواب واقعی یا بهینه کلی را ارائه نمایند (Soupios et al., 2011). بنابراین با یافتن بهینه کلی تابع هدف، بهترین جواب ممکن بدست خواهد آمد.

در این تحقیق برای وارون‌سازی امواج ری‌لی از روش جدیدی با استفاده از الگوریتم گرده‌افشانی گل^۲ استفاده شده است. این الگوریتم در چند سال اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته و با موفقیت در بسیاری از زمینه‌های علوم مختلف استفاده شده است (Emad, 2018). الگوریتم گرده‌افشانی گل، برخلاف بسیاری از الگوریتم‌های فراابتکاری، از پارامترهای اندکی برای حل یک مساله برخوردار است (Yang, 2012).

در مطالعه حاضر به منظور وارون‌سازی امواج سطحی سعی شد با استفاده از بهینه‌سازی مکانیسم جستجوی الگوریتم گرده‌افشانی گل، همگرایی الگوریتم بهبود یابد، که الگوریتم جدید، الگوریتم وارون‌سازی گرده‌افشانی گل بهینه^۳ نامیده شد. راهکارهای زیادی برای افزایش کارایی و سرعت همگرایی الگوریتم‌های تصادفی پیشنهاد شده است. یکی از این راهکارها ترکیب مکانیسم جستجوی یک الگوریتم بهینه ساز در الگوریتم دیگر است. از جمله مطالعات انجام شده در زمینه بهینه کردن الگوریتم FPA می‌توان به مطالعه Nabil (2018) اشاره نمود که با ترکیب مکانیسم جستجوی الگوریتم انتخاب کلونال در FPA، الگوریتم جدیدی را تحت عنوان الگوریتم گرده افشانی گل بهبودیافته (MFPA) معرفی نمود. همچنین Putra et al. (2016) با تغییر مکانیسم جستجوی محلی و کلی با الهام از الگوریتم ژنتیک، الگوریتم FPA بهینه جدیدی را در حل مسائل مرتبط با مصرف سوخت نیروگاه‌های برق معرفی نمودند که نسبت به FPA استاندارد، پاسخ‌های بهتری (حل‌هایی را با مصرف سوخت کم تر) را پیشنهاد داد. همچنین در مطالعه دیگری جهت بهینه کردن توزیع بار تاسیسات تولید برق از الگوریتم MFPA استفاده شد، بطوریکه یک ضریب عددی در جستجوی محلی FPA استاندارد وارد شد که توانست پاسخ‌های بهینه‌ای را ارائه نماید (Dubey et al., 2015).

در مطالعه حاضر عملکرد الگوریتم MFPA با استفاده از داده‌های مصنوعی و نیز داده‌های همراه نوفه مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین کارایی الگوریتم جدید با الگوریتم گرده افشانی گل استاندارد مورد مقایسه قرار گرفت. استفاده از الگوریتم گرده افشانی گل در وارون‌سازی امواج سطحی جدید است. همچنین در این مقاله وارون‌سازی داده‌های تجربی برداشت شده در یک ایستگاه در شهر تبریز با استفاده از الگوریتم معرفی شده نشان داده شده است. در پایان نتایج حاصل از روش

1-Global optimization

2-Flower Pollination Algorithm (FPA)

3-Modified FPA

4-deterministic

ضریب پواسون از رابطه ۲ محاسبه می‌گردد (نیکروز، ۱۳۹۳):

$$v_s/v_p = \left(\frac{1 - 2\sigma}{\sqrt{2(1 - \sigma)}} \right)^{1/2} \quad (2)$$

برای برقراری این رابطه، موج P باید همیشه سریع‌تر از موج S در همان ماده حرکت کند ($V_p > V_s$)، ($0 < \sigma < 0.5$).

در این مطالعه به منظور تخمین دقیق‌تر برای سرعت لایه‌ها، برای هر مدل تولید شده به وسیله الگوریتم، نسبت v_s/v_p مورد بررسی قرار می‌گیرد و در صورتی که نسبت پواسون مرتبط با آن در محدوده تعریف شده نباشد، تخمین این دو سرعت برای مدل مذکور تکرار می‌شود. این کار باعث کاهش حل‌های نادرست و در نتیجه همگرایی بهتر الگوریتم می‌گردد. برای وارون‌سازی خطای جذر میانگین مربع به‌عنوان تابع هدف (TF) در نظر گرفته شد:

$$TF = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n_p} (V_{obs} - V_{cal})^2}{n_p}} \quad (3)$$

که در معادله بالا متغیرها عبارتند از:

V_{obs} : سرعت فاز مشاهده شده

V_{cal} : سرعت فاز محاسبه شده

n_p : تعداد نمونه‌ها

در این مطالعه، به منظور حل مدل پیشرو و تخمین نمودار پاشش تئوری از کد ارائه شده توسط هرمن (Herrmann, 1987)، که بر اساس الگوریتم ماتریسی است، استفاده شد.

۳-۱- الگوریتم گرده‌افشانی گل (FPA)

در حالت کلی هدف از بهینه‌سازی یافتن بهترین جواب قابل قبول با توجه به محدودیت‌ها و نیازهای مساله است. روش‌های فراابتکاری قادر به حل طیف گسترده‌ای از مسائل بهینه‌سازی با دقت بالا و مناسب می‌باشند (Yang, 2010). این نوع الگوریتم‌ها، از فرآیندهای طبیعی و زیستی که در طبیعت وجود دارند، الهام گرفته شده‌اند (Deb et al., 2002). الهام از رشد گیاهان و گرده‌افشانی آنها یکی از روش‌های جدید تکاملی برای حل مسائل سخت و دشوار است؛ که ایده اصلی الگوریتم گرده‌افشانی گل‌ها بر این اساس ارائه شده است. در این الگوریتم مفاهیم حرکت و پرواز گرده‌ها در فضای اطراف گل‌ها، برای پخش شدن جمعیت اولیه گل‌ها در فضای یک مساله بهینه‌سازی استفاده می‌شود. این روش از فرآیند گرده‌افشانی گیاهان گل‌دار الهام گرفته شده است. در طبیعت دو نوع گرده‌افشانی خودالقایی^۱ و دگر القایی^۲ در گیاهان گل‌دار دیده می‌شود. در خودالقایی گرده‌های یک گل از یک گیاه بر روی یک گل دیگر از همان گیاه قرار می‌گیرد و در دگر القایی گرده‌های یک گل از یک گیاه بر روی یک گل از گیاه دیگر قرار می‌گیرد.

الگوریتم گرده‌افشانی گل (FPA) در سال ۲۰۱۲ به وسیله یانگ

این تفاوت که برخلاف روش‌های تصادفی محض، عنصر تصادفی بودن به‌صورت هوشمندانه‌ای در الگوریتم به کار گرفته می‌شود (Yang, 2010).

ویژگی‌های بارز یک روش فراابتکاری عبارتند از:

- روش‌های فراابتکاری معمولاً تخمینی و احتمالی هستند.
- این روش‌ها ممکن است از فرآیندهایی استفاده کنند که از فضای محدودکننده جواب به دور باشند.
- روش‌های فراابتکاری فرآیند جست‌وجو را هدایت می‌کنند.
- هدف این روش‌ها، جست‌وجوی مؤثر فضای جست‌وجو برای رسیدن به جواب‌های بهینه یا نزدیک به بهینه است.
- این روش‌ها از یک روش جست‌وجوی محلی ساده تا فرآیندهای یادگیری پیچیده را در بردارند.
- در بیشتر این روش‌ها از تجربه‌های قبلی برای هدایت کردن جست‌وجو استفاده می‌کنند (Poormirzaee et al., 2015, Sen and Stoffa, 1995, Yang, 2010).

در زمینه استفاده از روش‌های خطی در وارون‌سازی امواج سطحی می‌توان به مطالعه Xia et al. (1999) اشاره نمود؛ که با بهره‌گیری از ماتریس ژاکوبین و با در نظر گرفتن ضخامت و سرعت موج برشی لایه‌های زیرسطحی، به‌عنوان پارامترهای تاثیرگذار در نمودار پاشش امواج سطحی، یک روش خطی برای وارون‌سازی این امواج ارائه نمودند. اما به‌کارگیری روش‌های خطی به دلیل وابسته بودن به حدس اولیه برای شروع وارون‌سازی و تخمین‌های جدید از پارامترهای مساله، با خطر مواجهه با حل‌های غیرصحیح و یا گیرافتادن در نقاط بهینه محلی تابع خطا، روبرو هستند. این درحالی‌است که در روش‌های غیرخطی و فراابتکاری (مانند الگوریتم FPA)، الگوریتم‌ها به خاطر دارا بودن مکانیسم‌های جستجوی خاص، فضای جستجو را با دقت بالاتری بررسی می‌کنند و لذا از خطر گیرافتادن در کمینه‌های محلی به دور خواهند بود. از این رو در سال‌های اخیر روش‌های غیرخطی وارون‌سازی در مسائل ژئوفیزیکی از اهمیت بیشتری برخوردار شده است.

۳-۲- وارون‌سازی امواج پاشش ریلی

سرعت موج برشی (v_s)، سرعت موج طولی (v_p)، ضخامت و چگالی لایه‌ها پارامترهای مهمی هستند که بر منحنی پاشش امواج سطحی تاثیرگذارند. با توجه به مطالعات انجام شده در زمینه حساسیت منحنی پاشش امواج سطحی به این پارامترها، نشان داده شده است که بیشترین تاثیر را سرعت موج برشی و ضخامت لایه‌ها بر منحنی پاشش امواج سطحی دارند (Louie, 2001; Xia et al., 1999). نسبت سرعت موج برشی به سرعت موج طولی (v_s/v_p) به نام ضریب پواسون (σ) نامیده می‌شود و یکی از ضرایب پرکاربرد در اکتشافات لرزه‌ای می‌باشد.

1-Self-pollination

2-Cross-pollination

افشانی یک عدد مثبت است و به شکل رابطه ۵، نشان داده می‌شود (Yang, 2012):

$$L \sim \frac{\lambda \Gamma(\lambda) \sin(\frac{\pi\lambda}{2})}{\pi} \times \frac{1}{s^{1+\lambda}}, \quad s \gg s_0 > 0 \quad (5)$$

در این رابطه $\Gamma(\lambda)$ تابع گامای استاندارد است و مقدار مناسب برای این تابع $\lambda = 1/5$ انتخاب می‌شود. گرده‌افشانی محلی یا همان خودالقایی گل‌ها را می‌توان طبق رابطه ۶ مدل‌سازی نمود:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \varepsilon(x_j^t - x_i^t) \quad (6)$$

در این رابطه، x_i^t و x_j^t دو گرده مختلفی هستند؛ که از گل‌های مشابه ایجاد شده‌اند. ε یک عدد تصادفی بین صفر تا یک ایجاد می‌شود و اگر این عدد کمتر از $0/5$ باشد گرده‌افشانی محلی و اگر بیشتر از این مقدار باشد؛ گرده‌افشانی از نوع سراسری انجام می‌شود. در واقع عدد تصادفی میزان وقوع گرده‌افشانی سراسری یا محلی را کنترل می‌نماید (Yang, 2012). لازم به ذکر است در ابتدا الگوریتم گرده افشانی گل برای حل مسائل پیوسته ارائه شد؛ اما در ادامه جهت حل مسائل گسسته، الگوریتم گرده‌افشانی گل باینری ارائه شد؛ که در حل این نوع از مسائل نیز موفق بود (Alyasseri, et al., 2018). مراحل اجرای الگوریتم گرده-افشانی گل (FPA) عبارتست از:

۱. مقاردهی به پارامترهای الگوریتم
۲. ساخت جمعیت اولیه گل‌ها به صورت تصادفی
۳. ارزیابی موقعیت هر گل و محاسبه شایستگی آن
۴. شناسایی بهترین گل به عنوان g^*
۵. تا زمانی که شرط توقف برقرار نشده است مراحل ۶ تا ۱۲ تکرار شود.
۶. برای هر گل مراحل ۷ تا ۱۱ تکرار شود.
۷. به احتمال P به روزرسانی موقعیت گل با گرده‌افشانی محلی انجام شود.
۸. به احتمال $1-P$ به روزرسانی موقعیت گل با گرده‌افشانی سراسری انجام شود.
۹. شایستگی گل جدید محاسبه شود.
۱۰. اگر میزان شایستگی گل جدید بهتر از گل فعلی است، گل جدید جایگزین گل فعلی شود.
۱۱. اگر شایستگی گل جدید بهتر از g^* است، جایگزین g^* شود.
۱۲. اگر شرط توقف برقرار نشد به مرحله ۵ بازگشته و در غیر این صورت الگوریتم پایان می‌یابد.

معرفی شد (Yang, 2012). این روش با روش‌های ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات مقایسه شده و بیان شده که عملکرد بهتری نسبت به این دو روش دارد (Draa, 2015). الگوریتم FPA به دلیل دارا بودن مکانیسم مناسب جستجوی محلی و کلی و ایجاد یک تعادل در این دو نوع از جستجو، از توانایی بالایی در فرار از کمینه‌های محلی برخوردار است و در نتیجه از دقت و سرعت بالاتری در همگرایی به جواب بهینه کلی در مقایسه با الگوریتم ژنتیک، ازدحام گروه ذرات و حتی الگوریتم خفاش برخوردار می‌باشد (Alyasseri, et al., 2018).

با توجه به ویژگی‌های گرده‌افشانی در گیاهان گل‌دار می‌توان چهار قانون ساده را برای مدل‌سازی الگوریتم گرده‌افشانی گل ارائه داد (Yang, 2012):

- گرده‌افشانی از نوع دگر القایی چون از طریق پرواز گرده‌های گل به وسیله حشرات حاصل می‌شود؛ به عنوان گرده‌افشانی سراسری در نظر گرفته می‌شود.
- گرده‌افشانی از نوع خودالقایی حالت گرده‌افشانی محلی در نظر گرفته می‌شود.
- نوع گرده‌افشانی محلی و گرده‌افشانی سراسری یک گل، به وسیله یک احتمال در بازه $P \in [0, 1]$ در نظر گرفته می‌شود.
- در دنیای واقعی هر گیاه می‌تواند چندین گل و هر گل تعداد زیادی گرده تولید نماید؛ که این فرض مدل‌سازی مساله را دشوار می‌نماید. لذا برای سادگی کار می‌توان فرض نمود هر گیاه دارای یک گل و هر گل فقط یک گرده تولید می‌نماید. با این پیش فرض می‌توان الگوریتم گرده-افشانی گل را در دو گام اساسی گرده‌افشانی سراسری و محلی ایجاد نمود. در گام گرده‌افشانی سراسری، گرده هر گل توسط پرواز حشرات به مسافت‌های دور برده می‌شود. این نوع گرده‌افشانی باعث می‌شود که گرده در محدوده وسیعی از مساله جابجا شوند. این رفتار را می‌توان در قالب قانونی که در رابطه ۴ آمده است؛ بیان نمود (Yang, 2012).

$$x_i^{t+1} = x_i^t + L * (x_i^t - g_*) \quad (4)$$

x_i^t : مکان گرده نام در تکرار t ام.

x_i^{t+1} : مکان گرده نام در تکرار $(t+1)$ ام.

g_* : مکان بهترین گرده‌ای که تاکنون پیدا شده است.

L قدرت گرده‌افشانی نامیده می‌شود؛ که در اصل اندازه یک گام است و میزان جهش و پرش گرده‌ها را نشان می‌دهد. گرده i یا بردار راه‌حل x_i برای تکرار t و g_* در حال حاضر بهترین راه‌حل در میان تمام راه‌حل‌های نسل یا تکرار فعلی است. فرض بر این است که قدرت گرده-

در ادامه سعی شد با ایجاد تغییراتی در مکانیسم جستجوی کلی الگوریتم FPA، دقت و همگرایی آن در وارون‌سازی امواج سطحی بهبود یابد. به این منظور، با استفاده از یک ضریب افزایشی w وابسته به تکرار (رابطه ۷)، رابطه مربوط به جستجوی کلی الگوریتم استاندارد تغییر داده شد.

$$x_i^{t+1} = x_i^t + w * L * (x_i^t - g_*) \quad (7)$$

که در رابطه فوق w برابر است با:

$$w = Wmin + \left(\frac{(Wmax - Wmin)}{maxIter} \right) * Iter \quad (8)$$

در رابطه $Wmin$ و $Wmax$ به ترتیب برابر با معکوس تعداد لایه‌ها و معکوس تعداد گل‌ها (تعداد جمعیت) می‌باشند. همچنین $Iter$ و $maxIter$ به ترتیب برابر با تکرار و بیشترین مقدار تکرار در الگوریتم هستند. علاوه بر تغییر فوق، یک مرحله جهش با احتمال $1-P$ به الگوریتم گردهافشانی گل استاندارد اضافه شد. در مکانیسم‌های جستجوی کلی فوق، جستجو بصورت تدریجی و وابسته به تعداد لایه‌های مدل تغییر می‌کند. همچنین دیده می‌شود که با افزایش تکرار و نزدیک شدن به پاسخ نهایی، تنوع حل‌ها افزایش یافته؛ که این امر سبب کاهش خطر گرفتار شدن الگوریتم در بهینه‌های محلی می‌شود. در این مطالعه، الگوریتم با مکانیسم جستجوی ذکر شده الگوریتم وارون‌سازی گردهافشانی گل بهینه نامیده شده است. با توجه به روابط ۷ و ۸ الگوریتم بصورت خودکار میزان جهش و در نتیجه همگرایی به سمت بهینه کلی را کنترل می‌کند. به عبارت دیگر الگوریتم قدرت جستجوی فضای بیشتر را داشته و با نزدیک شدن الگوریتم به پایان تکرارها، شدت جهش‌ها افزایش یافته و در نتیجه تنوع حل‌ها یا جواب‌ها حفظ می‌شود. به منظور ارزیابی بهتر عملکرد الگوریتم بهینه شده، همچنین ضریب w بصورت کاهش‌ی مورد بررسی قرار گرفت و معادله ۸ به صورت زیر بازنویسی شد:

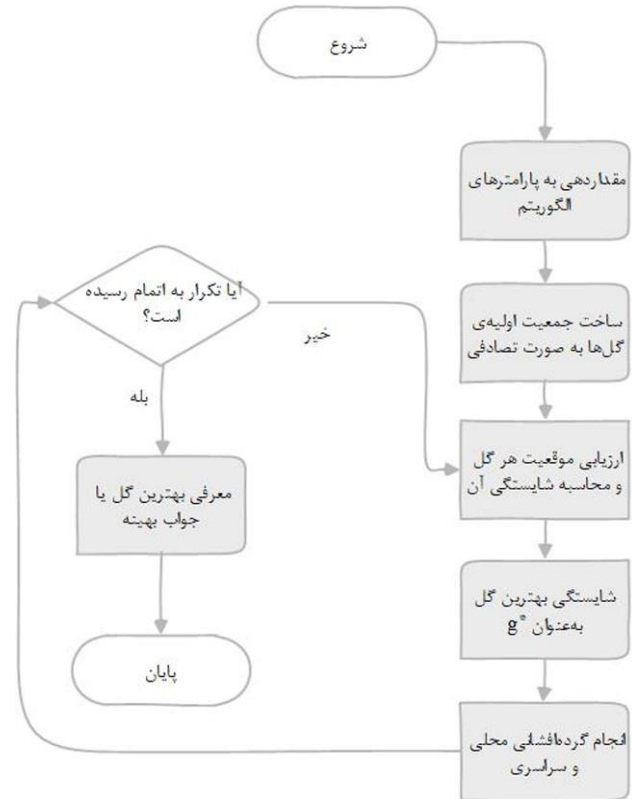
$$w = Wmin + \left(\frac{(Wmax - Wmin)}{Iter} \right) * maxIter \quad (9)$$

در رابطه فوق با افزایش تکرارها مقدار w کاهش یافته و در نتیجه فضای جستجو با گام‌های کوچکتری جستجو می‌شود. مدل A، با الگوریتم FPA بهینه وارون‌سازی شد؛ که نتایج آن در جدول (۳) آمده است. نتایج بیانگر آن است که مکانیسم جستجو با گام‌های افزایشی، دارای دقت و همچنین همگرایی بهتری است. همچنین مکانیسم جستجوی معرفی شده در بخش جستجوی محلی نیز بکار برده شد. البته نتایج بیانگر عملکرد بهتر الگوریتم گردهافشانی گل بهینه در حالتی است که تغییرات در بخش جستجوی سراسری و با گام‌های افزایشی انجام شده است.

جدول ۱: مدل A و فضای جستجو برای الگوریتم وارون‌سازی (مدل دو

لایه).

شماره لایه	Vp(m/s)	Vs(m/s)	فضای جستجو	
			H(m)	Vs(m/s)
۱	۷۵۰	۳۰۰	۱۰	۴۵۰ - ۱۵۰
۲	۱۵۰۰	۶۰۰	نیم فضا	۹۰۰ - ۳۰۰



شکل ۲: فلوجارت الگوریتم گردهافشانی گل.

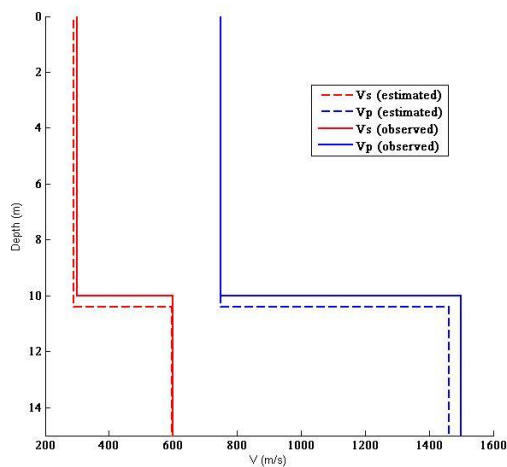
۲-۳- وارون‌سازی داده‌های امواج ری لی (مدل مصنوعی)

۲-۳-۱ تحلیل حساسیت FPA و MFPA برای مدل دولایه

الگوریتم FPA نخست برای وارون‌سازی منحنی پاشش مورد بررسی قرار گرفت. سپس با تغییراتی در مکانیسم جستجوی این الگوریتم، الگوریتم گردهافشانی گل بهینه (MFPA) ارائه شد. در ادامه عملکرد این دو الگوریتم مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد. برای ارزیابی الگوریتم‌های وارون‌سازی پیشنهاد شده در این مطالعه، ابتدا یک مدل مصنوعی (مدل A) مورد مطالعه قرار گرفت. امواج پاشش تولید شده برای مدل‌های مورد بررسی در این بخش با فرض یک آرایش خطی با ۱۲ گیرنده (۴/۵ هرتز) که با فواصل ۴ متر قرار گرفته‌اند؛ ایجاد شده است. مدل A، یک مدل ساده، از یک لایه بر روی نیم‌فضا تشکیل شده است (که یک مدل دولایه نامیده می‌شود). جدول (۱) بیانگر پارامترهای این مدل بوده، و فضای جستجوی الگوریتم‌ها را نشان می‌دهد. محدوده فرکانسی ۵ تا ۵۰ هرتز با تعداد ۳۰ نمونه برای محاسبه منحنی پاشش مدل مصنوعی استفاده شد. مجموعه داده‌های موردنظر در برنامه Geopsy تولید شد (GeopsySite). در استفاده از الگوریتم FPA با تکرار چندین باره وارون‌سازی با تعداد گل‌ها، تعداد تکرار و گام‌های متفاوت، میزان بهینه این پارامترها با در نظر گرفتن میزان دقت و همچنین سرعت همگرایی آنها تعیین شد. مقدار بهینه تعداد گل‌ها برابر با ۵۰، تعداد تکرار ۲۵ و اندازه گام برابر با ۰/۱ بدست آمد (جدول ۲).

جدول ۳: مقایسه نتایج حاصل از وارون‌سازی مدل A با استفاده از FPA بهینه.

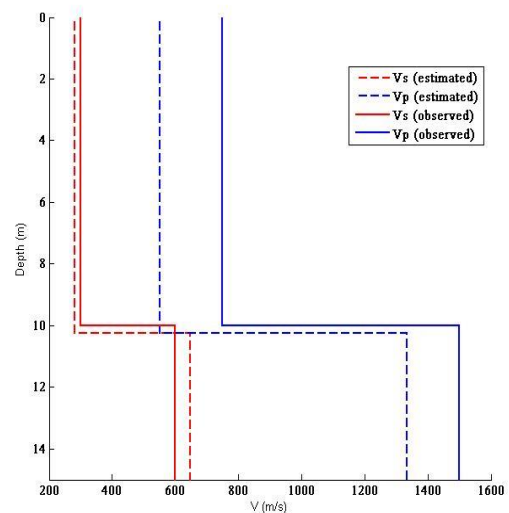
انحراف معیار استاندارد	درصد خطا %	محاسبه شده	مشاهده‌ای	پارامترها
تغییر مکانیسم جستجو در جستجوی محلی				
۷۲/۴۰	۸/۲۵	۲۷۵/۲۵	۳۰۰	Vs1
۲۰۴/۲۶	۴/۷۱	۶۲۸/۲۸	۶۰۰	Vs2
۲۲۱/۹۶	۲/۴۵	۷۶۸/۴۳	۷۵۰	Vp1
۶۲۹/۵۲	۱۰/۲۹	۱۶۵۴/۴	۱۵۰۰	Vp2
۲/۶۴	۱۰/۲۱	۱۱/۰۲	۱۰	H1
تغییر مکانیسم جستجو در جستجوی سراسری با گام‌های کاهش				
۹۹/۳۵	۱۷/۲۰	۳۵۱/۶۲	۳۰۰	Vs1
۱۹۶/۳۴	۱۰/۳۰	۶۶۱/۸۲	۶۰۰	Vs2
۱۹۰/۹۷	۳۲/۹۷	۵۰۲/۷۳	۷۵۰	Vp1
۴۷۷/۸۷	۲۳/۹۲	۱۸۵/۸	۱۵۰۰	Vp2
۱/۰۴	۷۲/۰	۱۰/۰۷	۱۰	H1
تغییر مکانیسم جستجو در جستجوی سراسری با گام‌های افزایشی				
۱۰۲/۱	۶/۵۴	۳۱۹/۶	۳۰۰	Vs1
۱۱۹/۵	۴/۰۹	۶۲۴/۶	۶۰۰	Vs2
۲۵۴/۵	۱۰/۵۹	۶۷۰/۶	۷۵۰	Vp1
۶۲۷/۳	۱۸/۱۴	۱۷۷۲	۱۵۰۰	Vp2
۱/۳۳	۸/۹۲	۱۰/۹	۱۰	H1
تغییر مکانیسم جستجو در جستجوی سراسری با گام‌های افزایشی و اضافه شدن جهش به احتمال ۱-p				
۲۱/۶۳	۳/۷۹	۲۸۸/۶۰	۳۰۰	Vs1
۱۹/۶۹	۰/۳۵	۵۹۷/۸۵	۶۰۰	Vs2
۲۲/۸۳	۰/۳	۷۵۰/۲۴	۷۵۰	Vp1
۱۵/۶۳	۲/۱۰	۱۴۶۳/۳۵	۱۵۰۰	Vp2
۳/۶۸	۴/۴۸	۱۰/۴	۱۰	H1



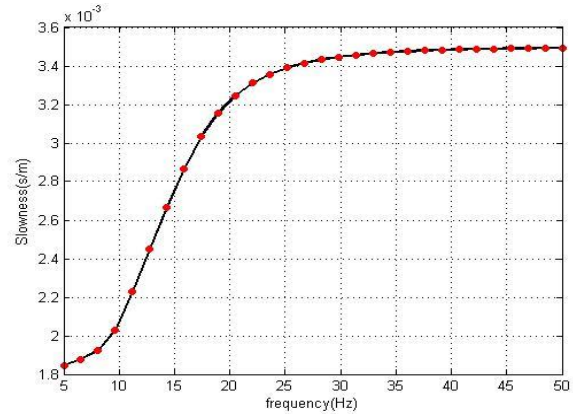
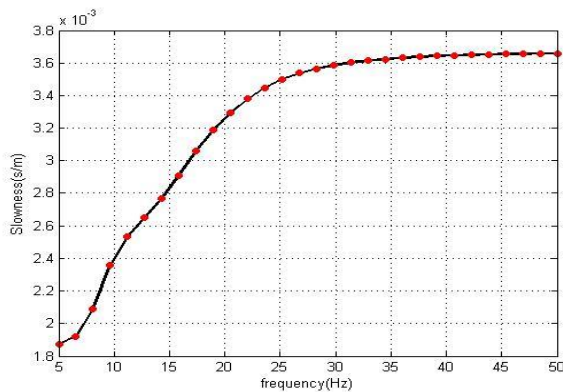
شکل ۴: پروفیل سرعتی حاصل از مدل A با استفاده از FPA بهینه.

جدول ۲: مقایسه نتایج حاصل از وارون‌سازی مدل A با استفاده از FPA استاندارد.

انحراف معیار	درصد خطا	محاسبه	مشاهده‌ای	پارامترها
تعداد گل‌ها ۸۰ و تعداد تکرار ۶۰ و اندازه گام ۰/۰۰۱				
۶۳/۸۷	۲۴/۱۰	۳۷۲/۳۲	۳۰۰	Vs1
۱۶۷/۳	۴/۴۲	۵۷۳/۴	۶۰۰	Vs2
۲۱۹/۳۵	۳۰/۳	۵۲۲/۷۵	۷۵۰	Vp1
۳۴۲/۱	۱۸/۱۱	۱۷۷۱/۷	۱۵۰۰	Vp2
۲/۸۸	۸/۳۷	۹/۱۶	۱۰	H1
تعداد گل‌ها ۸۰ و تعداد تکرار ۱۰۰ و اندازه گام ۰/۰۱				
۹۴/۸۸	۱۳/۰۵	۳۳۹/۱۶	۳۰۰	Vs1
۱۹۵/۸۸	۸/۹۳	۵۴۶/۳۹	۶۰۰	Vs2
۲۴۶/۸	۱۰/۸۵	۶۶۸/۵۵	۷۵۰	Vp1
۶۱۱/۴۷	۶/۳۵	۱۵۹۵/۳	۱۵۰۰	Vp2
۲/۸۰	۲/۵۳	۹/۷۴	۱۰	H1
تعداد گل‌ها ۸۰ و تعداد تکرار ۶۰ و اندازه گام ۰/۰۱				
۱۰۵/۳	۵/۵۱	۳۱۶/۵	۳۰۰	Vs1
۱۸۰	۲/۳	۵۸۶	۶۰۰	Vs2
۲۱۷/۴	۳۵/۷	۴۸۲/۳	۷۵۰	Vp1
۴۶۳/۸	۹/۳۱	۱۶۴۰	۱۵۰۰	Vp2
۲/۸۲	۷/۳۲	۱۰/۷۳	۱۰	H1
تعداد گل‌ها ۵۰ و تعداد تکرار ۲۵ و اندازه گام ۰/۰۱				
۱۰۱/۲	۷/۹۸	۲۸۲/۶	۳۰۰	Vs1
۱۷۲	۵/۸۱	۶۴۸	۶۰۰	Vs2
۲۸۸/۳	۲۶/۳۴	۵۵۲/۵	۷۵۰	Vp1
۴۴۸/۱	۱۱/۰۵	۱۳۳۴	۱۵۰۰	Vp2
۲/۷۳	۲/۳۸۲	۱۰/۲۴	۱۰	H1



شکل ۳: پروفیل سرعتی حاصل از مدل A با استفاده از FPA استاندارد.

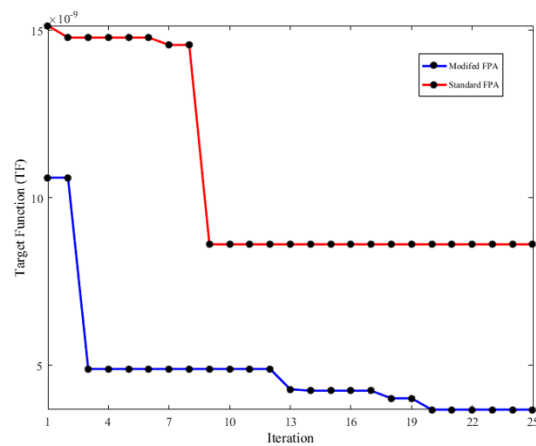


شکل ۵: منحنی پاشش حاصل از مدل A با استفاده از الگوریتم FPA بهینه‌شده (نقاط قرمز بیانگر مقادیر تخمینی و خط مشکی بیانگر مقادیر مشاهده‌ای می‌باشند).

شکل ۷: منحنی پاشش بدست‌آمده از مدل A با ۱۰ درصد نوفه (نقاط قرمز بیانگر مقادیر تخمینی و خط مشکی بیانگر مقادیر مشاهده‌ای می‌باشند).

۳-۲-۲ تحلیل حساسیت MFPA برای مدل سه لایه

برای ارزیابی بیشتر الگوریتم وارون‌سازی معرفی شده، یک مدل سه لایه (مدل B) مورد بررسی قرار گرفت؛ که در جدول (۵) پارامترهای مدل و فضای جستجو نشان داده شده است. در این مدل تعداد گل‌ها ۱۰۰ و تعداد تکرار ۵۰ در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از وارون‌سازی این مدل در جدول ۶ نشان داده شده است.



جدول ۵: مدل B و فضای جستجو برای الگوریتم وارون‌سازی (مدل سه لایه).

شکل ۶: مقایسه همگرایی الگوریتم FPA بهینه و استاندارد در وارون‌سازی مدل A.

فضای جستجو		H(m)	Vs(m/s)	Vp(m/s)	شماره لایه
H(m)	Vs(m/s)				
۱۵-۵	۴۵۰-۱۵۰	۱۰	۳۰۰	۷۵۰	۱
۲۰-۱۰	۹۰۰-۳۰۰	۱۵	۶۰۰	۱۵۰۰	۲
-	۱۳۵۰-۴۵۰	نیم فضا	۹۰۰	۲۳۰۰	۳

جدول ۶: نتایج بدست‌آمده از مدل B با استفاده از MFPA (مدل سه لایه).

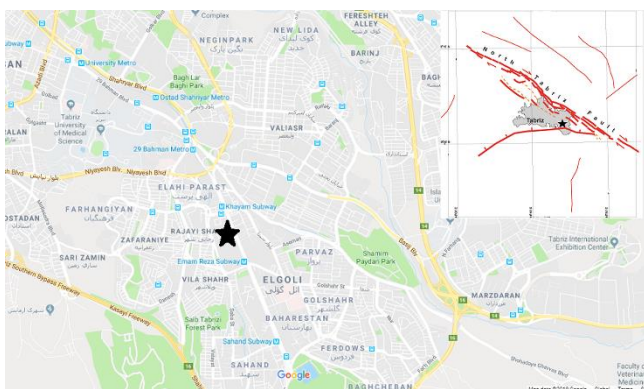
جدول ۴: نتایج وارون‌سازی مدل A با ۱۰٪ و ۲۰٪ نوفه با استفاده از MFPA.

انحراف معیار	درصد خطا %	محاسبه شده	مشاهده‌ای	پارامترها
۳۶/۳۲	۲/۸۰	۲۹۱/۵۷	۳۰۰	Vs1
۱۰/۷۵	۰/۲۱	۷۴/۵۹۸	۶۰۰	Vs2
۲۵/۵۳	۰/۱۱	۹۰۱/۰۶	۹۰۰	Vs3
۱۱/۹۰	۰/۰۱	۷۵۰/۱۴	۷۵۰	Vp1
۱۵/۵۹	۱/۸۳	۱۴۷۲/۴	۱۵۰۰	Vp2
۲۲/۲۴	۰/۳۶	۲۲۹۱/۷	۲۳۰۰	Vp3
۳/۳۴	۳/۴۶	۹/۶۵	۱۰	H1
۳/۳۶	۴/۰۱	۱۵/۶۰	۱۵	H2

انحراف معیار	درصد خطا %	محاسبه شده	مشاهده‌ای	پارامترها
نوفه ۱۰٪				
۱۷/۹۲	۳/۴۷	۲۸۹/۵۶	۳۰۰	Vs1
۲۳/۵۹	۰/۵۸	۵۹۶/۴۶	۶۰۰	Vs2
۱۶/۴۵	۰/۹۲	۷۵۶/۹۲	۷۵۰	Vp1
۲۲/۰۴	۱/۴۰	۱۴۷۹	۱۵۰۰	Vp2
۳/۵۰	۷/۲۳	۹/۲۷	۱۰	H1
نوفه ۲۰٪				
۲۱/۰۰	۳/۶۰	۳۱۳	۳۰۰	Vs1
۱۶/۳۰	۰/۴۷	۶۰۳	۶۰۰	Vs2
۱۵/۱۳	۲/۱	۷۶۵	۷۵۰	Vp1
۱۹/۹۷	۲/۰۸	۱۴۶۵	۱۵۰۰	Vp2
۳/۵۳	۹/۳	۱۰/۹۰	۱۰	H1

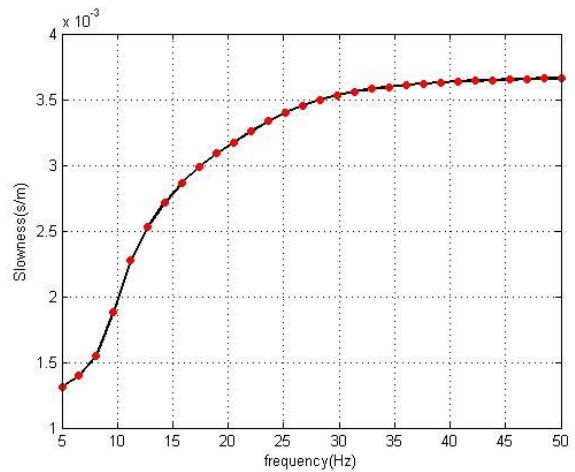
سنگ‌بستر بخش جنوبی تبریز با توجه به ستون چینه‌شناسی حدود ۱۰ متر می‌باشد (Golpasand et al., 2013). شهر تبریز تحت تأثیر آبرفتی است که از فرسایش ارتفاعات اطراف شهر حاصل شده و عمق آن به سمت مرکز شهر افزایش نشان می‌دهد. نیمه جنوبی تبریز که ناحیه ائل‌گولی در آن قرار دارد، روی لایه‌های آذرآوری سه‌ساخته شده است و بیشتر از توف، خاکستر و برش آتشفشانی تشکیل شده و گاه برخی از لایه‌های آن به علت فقدان سیمان در محیط رسوبی کمتر تحکیم یافته‌اند؛ اما بسیاری از لایه‌ها تحکیم یافته و مانند یک پی‌سنگ تمام‌عیار در عبور دهی امواج رفتار می‌کنند (فریدی و خداندوله، ۱۳۹۰).

برای وارون‌سازی داده‌های تجربی، تعیین محدوده‌های جستجوی الگوریتم و در نظر گرفتن تعداد لایه بسیار مهم است. برای این منظور از اطلاعات زمین‌شناسی، اطلاعات پهنه‌بندی شهر تبریز استفاده شد. همچنین از نمودار منحنی پاشش جمع‌آوری شده در این مطالعه استفاده شد؛ تا مدل احتمالی پیشنهاد شود. لازم به ذکر است چندین مدل مختلف با تعداد لایه‌های مختلف مورد آزمون واقع شد و در نهایت یک مدل سه لایه برای ایستگاه مورد مطالعه پیشنهاد شد (شکل ۱۱ و ۱۲).

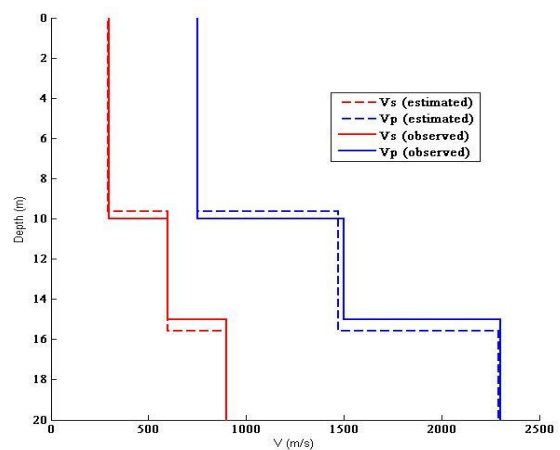


شکل ۱۰: موقعیت ایستگاه برداشت‌شده در شهر تبریز (علامت ستاره موقعیت ایستگاه برداشت داده را نشان می‌دهد).

نتایج وارون‌سازی ایستگاه مورد مطالعه برای مدل‌های دو و سه لایه به ترتیب در جداول (۷ و ۸) نشان داده شده است. نتایج دو مدل با اطلاعات زمین‌شناسی و همچنین مطالعات پهنه‌بندی لرزه‌ای ناحیه موجود مقایسه شد؛ که مدل سه لایه با مدل‌های لرزه‌ای قبلی در منطقه مورد مطالعه (شرکت مهندسی مشاور تهران پادیر ۱۳۸۸) از تطابق بسیار مناسبی برخوردار است (شکل ۱۳).



شکل ۸: منحنی پاشش بدست آمده از مدل B (نقاط قرمز بیانگر مقادیر تخمینی و خط مشکی بیانگر مقادیر مشاهده‌ای می‌باشند).

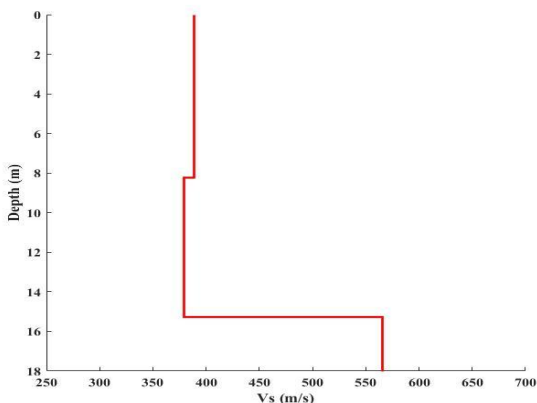


شکل ۹: پروفیل سرعتی حاصل از مدل B (مدل سه لایه).

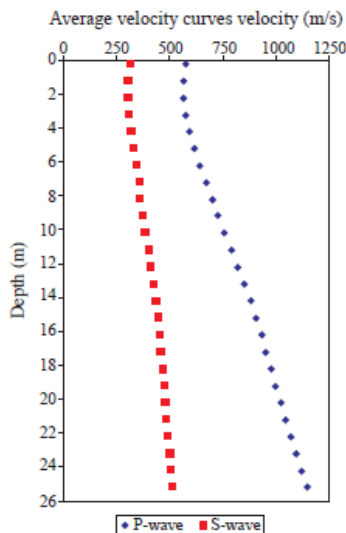
۴- وارون‌سازی داده‌های تجربی

در ادامه الگوریتم معرفی شده با داده‌های تجربی نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. داده‌های تجربی مربوط به یک نقطه از شهر تبریز است؛ که در شکل ۱۰ قابل مشاهده است. این نقطه در نزدیکی جاده ائل‌گولی تبریز بوده و بنا به گزارش حفاری‌های مربوط به مطالعاتی که برای متروی تبریز صورت گرفته، عمق سنگ‌بستر در جاده ائل‌گولی در حدود ۱۰ متر و عمق آب‌های زیرزمینی در حدود ۸ متر است. به طور کلی عمق

شکل ۱۱۱: منحنی پاشش داده‌های تجربی حاصل از وارون‌سازی یک مدل سه لایه (نقاط قرمز بیانگر مقادیر تخمینی و خط مشکی بیانگر مقادیر مشاهده‌ای می‌باشند).



شکل ۲۱۲: پروفیل سرعتی موج برشی حاصل از داده‌های تجربی.



شکل ۳۱۳: نمودار سرعت متوسط امواج طولی و برشی با استفاده از لرزه‌نگاری درون چاهی در اطراف ایستگاه مورد مطالعه (شرکت مهندسی مشاور تهران پادیر ۱۳۸۸).

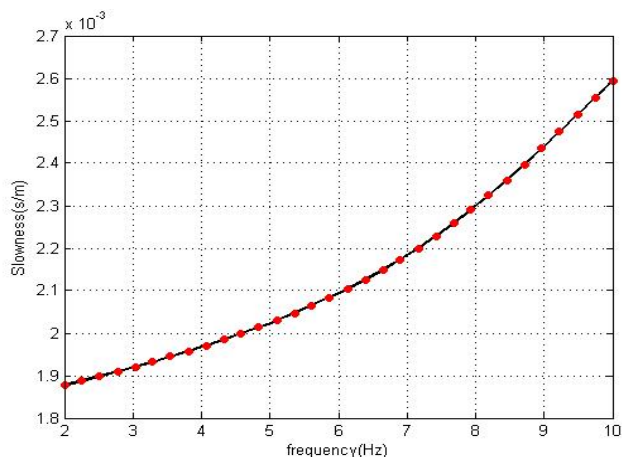
حرکت آن‌ها، دارای یک تابع هدف پیچیده و غیرخطی است. در این مطالعه الگوریتم گردهافشانی گل که از روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری است، برای وارون‌سازی امواج سطحی معرفی شد. این الگوریتم در نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی شد. در ادامه الگوریتم معرفی شده با استفاده از مدل‌های مصنوعی مورد آزمایش قرار گرفت تا حساسیت پارامترهای آن در وارون‌سازی داده‌ها شناخته شود. نتایج حاصل شده بیانگر عملکرد قابل قبول الگوریتم در تخمین پارامترهای مدل (سرعت و ضخامت لایه‌ها) بود. در ادامه الگوریتم گردهافشانی گل (استاندارد) جهت دقت و همگرایی بهتر بهینه شد. در الگوریتم جدید معرفی شده مکانیسم جستجوی الگوریتم با یک ضریب w که به صورت تدریجی و متناسب با ویژگی‌های مدل بصورت

جدول ۷: فضای جستجو و نتایج حاصل از وارون‌سازی داده‌های تجربی با استفاده از MFPA (مدل دو لایه).

پارامترها	فضای جستجو	FPA
Vs1	۶۰۰-۲۰۰	۳۴۳
Vs2	۷۰۰-۳۵۰	۷۷۵
Vp1	۷۵۰-۲۵۰	۴۱۸
Vp2	۱۶۰۰-۵۵۰	۱۰۶۲
H1	۹-۳	۷/۴۸

جدول ۸: فضای جستجو و نتایج حاصل از وارون‌سازی داده‌های تجربی با استفاده از MFPA (مدل سه لایه).

پارامترها	فضای جستجو	FPA
Vs1	۴۰۰-۲۵۰	۳۸۸
Vs2	۵۰۰-۲۵۰	۳۷۹
Vs3	۶۵۰-۳۰۰	۵۶۵
Vp1	۶۵۰-۴۰۰	۵۴۷
Vp2	۱۰۰۰-۵۰۰	۶۵۳
Vp3	۲۴۰۰-۹۰۰	۱۷۵۷
H1	۹-۲	۸/۰۲
H2	۱۰-۳	۷/۲۲



۵- نتیجه‌گیری

شناخت ساختارهای سرعتی و شناخت ویژگی‌های لرزه‌ای یک منطقه می‌تواند کمک قابل توجهی در مسائل مرتبط با شهرسازی و مقابله با خسارت زلزله‌ها داشته باشد. روش‌های لرزه‌ای بر مبنای امواج سطحی (ری‌لی)، مانند داده‌های میکروترمو، می‌تواند یک روش آسان، سریع و کم‌هزینه برای مطالعات لرزه‌ای باشند. اما آنچه تفسیر این داده‌ها را با مشکل روبرو کرده، وارون‌سازی امواج سطحی و در نتیجه ابهام در نتایج آن است. وارون‌سازی امواج سطحی با توجه به نوع معادلات حاکم بر

۶- فهرست نمادها

نماد	واحد	شرح
v_s	m/s	سرعت موج برشی
v_p	m/s	سرعت موج طولی
σ	-	نسبت پواسون
H	m	ضخامت لایه
ε	-	مقدار تصادفی بین ۱ تا ۰
Γ	-	تابع گاما
λ	-	مقدار ثابت
L	-	اندازه گام (توزیع Levy)

۷- منابع

فریدی، م. و خدابنده‌لو، ع.، ۱۳۹۰، نقشه زمین‌شناسی ۱/۲۵۰۰۰ تبریز، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ویرایش سوم.

مهندسیین مشاور تهران پادیر، مطالعات ریز پهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای شهر تبریز، ۱۳۸۸، سازمان مسکن و شهرسازی آذربایجان شرقی، جلد ششم.

نیکروز، ر.، ۱۳۹۳، کاربرد روش‌های لرزه‌ای شکست‌مرزی در اکتشافات ژئوفیزیکی، انتشارات دانشگاه ارومیه.

Alyasseri, Z.A.A., Khader, A.T., Al-Betar M.A., Awadallah M.A., Yang X.S., 2018, Variants of the Flower Pollination Algorithm: A Review. In: Yang X.S. (eds) Nature-Inspired Algorithms and Applied Optimization. Studies in Computational Intelligence, vol 744. Springer, Cham

Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. & Meyarivan, T. 2002, A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. IEEE Transactions on evolutionary computation, 6, 182-197.

Draa, A. 2015, On the performances of the flower pollination algorithm – Qualitative and quantitative analyses. Applied Soft Computing, 34, 349-371.

Dubey, H.M., Pandit, M., Panigrahi, B.K., 2015, A biologically inspired modified flower pollination algorithm for solving economic dispatch problems in modern power systems. Cogn. Comput. 7(5), 594-608.

GeopsySite. Available: <http://www.geopsy.org>.

Golpasand, M. R., Nikudel, M. & Uromeihy, A. 2013, Predicting the occurrence of mixed face conditions in tunnel route of Line 2 Tabriz metro, Tabriz, Iran.

خودکار تنظیم می‌شود، تغییر داده شد. الگوریتم بهینه شده (MFPA) در وارون‌سازی امواج ری لی بسیار موفق بود و نسبت به الگوریتم استاندارد همگرایی و دقت بهتری را در تخمین پارامترهای مدل ارائه نمود. علت عملکرد بهتر MFPA را می‌توان به قدرت بهتر آن در تولید حل‌های متنوع و یا به عبارت دیگر قدرت جستجوی بالاتر آن دانست. همچنین الگوریتم MFPA به دلیل توانایی بیشتر جهش^۱ در فضای جستجو، از خطر گیرافتادن در کمینه‌های محلی به دور خواهد بود. البته الگوریتم MFPA پیشنهادی، نسبت به الگوریتم FPA از یک مرحله جهش اضافه برخوردار است؛ که این امر ممکن است، سبب صرف زمان زیاد جهت اجرای کد نوشته شده شود. هر چند با توجه به نتایج (شکل ۶ و جداول ۳ و ۲)، سرعت همگرایی و دقت بالای MFPA در مدت زمانی مشابه با الگوریتم FPA، بیانگر عملکرد مناسب الگوریتم MFPA در وارون‌سازی امواج سطحی بود. همچنین مشاهده شد به ازای تغییر تدریجی و افزایش w نتایج از دقت بهتری برخوردار هستند. عملکرد MFPA در وارون‌سازی یک مدل دو لایه در حضور نوفه با مقادیر ۱۰٪ و ۲۰٪ نیز مورد بررسی قرار گرفت، که نتایج قابل قبولی را ارائه نمود (جدول ۴). همچنین به منظور مطالعه بهتر توانایی الگوریتم معرفی شده در وارون‌سازی، یک مدل سه لایه نیز مورد بررسی قرار گرفت؛ که روش ارائه شده تخمین مناسبی از ضخامت و سرعت امواج ارائه نمود. در پایان MFPA برای داده‌های تجربی نیز استفاده شد. داده‌های تجربی که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت، مربوط به یک ایستگاه برداشت داده‌های میکروتومور بود که در جنوب شهر تبریز، در مجاورت خیابان ائل‌گولی برداشت شد. با استفاده از اطلاعات کمی (اطلاعات زمین‌شناسی و لرزه‌ای) منطقه مورد مطالعه و همچنین منحنی پاشش بدست آمده؛ پس از آزمون مدل‌های مختلف یک مدل سه لایه برای وارون‌سازی داده‌های برداشت شده پیشنهاد شد. تفکیک سه لایه با سرعت‌های برشی در محدوده ۳۵۰ متر بر ثانیه تا ۵۵۰ متر بر ثانیه در تطابق خوبی با مطالعات زمین‌شناسی و گزارش‌های پهنه‌بندی لرزه‌ای قبلی در منطقه است.

با توجه به نتایج حاصل از این مطالعه، به نظر می‌رسد روش‌های وارون‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی مبتنی بر روش‌های فراابتکاری در ارائه پارامترهای مدل در مقایسه با روش‌های مرسوم خطی، به دلیل هوشمندی این روش‌ها و جستجوی مناسب فضای پارامترهای مدل و نیز مستقل بودن از حدس اولیه در شروع عملیات وارون‌سازی، یک راهکار مناسب برای کاهش ابهام در نتایج وارون‌سازی امواج سطحی و نیز سایر داده‌های ژئوفیزیکی هستند. بنابراین روش وارون‌سازی MFPA به دلیل سرعت همگرایی مناسب و دقت بالای آن برای بهینه نمودن تابع هدف، از جمله روش‌های موفق فراابتکاری در زمینه وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای است.

1-mutation

- Putra, P.H., Saputra, T.A., et al., 2016, Modified flower pollination algorithm for nonsmooth and multiple fuel options economic dispatch. In: 8th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), pp. 1-5. IEEE.
- Roy, K. K. 2007, Potential Theory in Applied Geophysics, Springer Berlin Heidelberg.
- Sen, M. & Stoffa, P. 1995, Global optimization method in geophysical inversion: Elsevier Sci. Publ. Co., The Netherlands.
- Soupios, P., Akca, I., Mpogiatis, P., Basokur, A. T. & Papazachos, C. 2011, Applications of hybrid genetic algorithms in seismic tomography. Journal of Applied Geophysics, 75, 479-489.
- Wathelet, M. 2005, Array recordings of ambient vibrations: surface-wave inversion. PhD Diss, Liège University.
- Wathelet, M., Jongmans, D. & Ohrnberger, M. 2005, Direct Inversion of Spatial Autocorrelation Curves with the Neighborhood Algorithm. Bulletin of the Seismological Society of America, 95, 1787-1800.
- Xia, J., Miller, R.D., Park, C.B. 1999, Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves. Geophysics 64:691-700.
- Yang, X.-S. 2010, Engineering Optimization: An Introduction with Metaheuristic Applications, Wiley.
- Yang, X.-S. 2012, Flower Pollination Algorithm for Global Optimization. In: Durand-Lose, J. & Jonoska, N., eds. Unconventional Computation and Natural Computation, Berlin, Heidelberg. Springer, 240-249.
- Herrmann, R. 1987, Computer Programs in Seismology, Vol. Saint Louis University.
- Louie, J. N. 2001, Faster, Better: Shear-Wave Velocity to 100 Meters Depth from Refraction Microtremor Arrays. Bulletin of the Seismological Society of America, 91, 347-364.
- Menke, W. 1989, Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory. Inter. Geophysics Series, 45.
- Nazarian, S. 1984, In situ shear wave velocities from spectral analysis of surface wave. Proceedings of 8th Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, 1984.
- Neumüller, C., Wagner, S., Kronberger, G. & Affenzeller, M. 2012, Parameter Meta-optimization of Metaheuristic Optimization Algorithms. In: Moreno-Díaz, R., Pichler, F. & Quesada-Arencibia, A., eds. Computer Aided Systems Theory – EUROCAST 2011, Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg, 367-374.
- Poormirzaee, R. 2016, S-wave velocity profiling from refraction microtremor Rayleigh wave dispersion curves via PSO inversion algorithm. Arabian Journal of Geosciences, 9, 673.
- Poormirzaee, R. 2018, MOPSO: a new computing algorithm for joint inversion of Rayleigh wave dispersion curve and refraction traveltimes. Exploration Geophysics, 49, 163-175.
- Poormirzaee, R., Moghadam, R. H. & Zarean, A. 2015, Inversion seismic refraction data using particle swarm optimization: a case study of Tabriz, Iran. Arabian Journal of Geosciences, 8, 5981-5989.



Inversion of Rayleigh wave dispersion curves using modified flower pollination algorithm (MFPA) to detect shear wave velocity profile

Rashed Poormirzaee^{2*}, Nesa Esazadeh¹, Ramin Nikroz³ and Mohammad Noormohammady Barandagh⁴

1. MSc., Faculty of Science, Urmia University, Urmia

2. Assistant Professor, Faculty of Mining and Material Engineering, Urmia University of Technology, Urmia

3. Associate Professor, Faculty of Science, Urmia University, Urmia

4. MSc., Faculty of Science, Urmia University, Urmia

Received: 20 March 2019; Accepted: 5 August 2019

Corresponding author: rashed.poormirzaee@gmail.com

Keywords

Surface waves
Shear wave velocity
Inversion
Modified flower pollination algorithm

Extended Abstract

Summary

In this study, for inversion of surface wave dispersion curves, a new modified flower pollination algorithm (MFPA) is introduced. The goal of the proposed algorithm is to find the unknown parameters of the problem, i.e., the thicknesses and shear wave velocities of the soil layers. The performance of the algorithm has been evaluated by synthetic models and also actual dataset. The results, in both of synthetic models and experimental data, represent the acceptable performance of the proposed algorithm. The MFPA inversion method is a suitable technique for

reducing the non-uniqueness of the surface wave inversion task.

Introduction

The inversion of the surface wave dispersion curves is one of the practical issues in identifying the subsurface layers and shear wave velocities structures. Shear wave velocity is one of the most important parameters in geotechnical studies that is used to evaluate soil properties, including site effects and seismic microzonation. Typically, surface waves are used to estimate the shear wave velocity. Linear inversion methods are not very reliable due to the nonlinear nature of the problem. With the development of computer sciences and the development of intelligent optimization methods, rapid and easy techniques for inversion of surface waves could be used. In this paper, a new modified flower pollination algorithm (MFPA) for inversion of Rayleigh wave dispersion curves is introduced. In the proposed algorithm in comparison to standard flower pollination algorithm (FPA), the exploration ability of the algorithm is improved.

Methodology and Approaches

In order to process surface waves and find an adequate shear wave velocity structure, a new hybrid metaheuristic algorithm that adds a dynamic factor to mutation operator of the standard FPA, called MFPA, is applied. In this study, the mutation rate increases gradually from $Wmin$ ($1/\text{number of flowers}$) to $Wmax$ ($1/\text{number of subsurface layers}$) as the number of iterations is increased. The MFPA approach could accelerate the convergence speed in comparison to the standard FPA. The code of the MFPA inversion method has been written in MATLAB environment. Then, the proposed technique has been tested on a synthetic dataset. To more explore the reliability of the applied method, 10 percent noise has also been added to the synthetic dataset. The results of synthetic dataset show the capability of the MFPA technique in the absence and presence of noise. For further evaluation of the proposed method, the MFPA has been applied on an actual dataset for geotechnical assessment in an area in the city of Tabriz, northwest of Iran. The results of the experimental data indicate a three-layer model that is in a good agreement with the geological evidence of the study area.

Results and Conclusions

In this study, a new surface wave inversion algorithm, i.e. MFPA is proposed. Then, capability of this technique is tested by synthetic and actual datasets. The results show that the applied method is a fast and powerful technique in the inversion of surface wave dispersion curves. Moreover, the performance of MFPA has been compared with standard FPA. Because of strong exploration ability of MFPA, this algorithm in estimation of the model parameters has higher convergence and accuracy than FPA.